

# **ZEOLITA NATURAL PARA LA MEJORA DE MORTEROS ELABORADOS CON EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE KEIL MODIFICADO**

**Jorge Luis Costafreda Mustelier <sup>(1)</sup>, Benjamín Calvo Pérez <sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Doctor Ingeniero Geólogo por la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIM). Departamento de Ingeniería Geológica. Telf: 91 336 7025. E-mail: ([costafreda@yahoo.es](mailto:costafreda@yahoo.es)). <sup>(2)</sup> Catedrático por la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIM). Departamento de Ingeniería Geológica. Telf: 91 336 7069. E-mail: ([benjamin.calvo.perez@gmail.com](mailto:benjamin.calvo.perez@gmail.com)).

## **Resumen:**

El empleo de zeolita natural en la mejora de cementos, morteros y hormigones en los últimos años avala su consideración como agregado idóneo para aumentar la cohesión, la durabilidad y la reología en el tiempo. El presente trabajo pretende demostrar una vez más la eficiencia de la mordenita en el estímulo de las reacciones hidráulicas y en el incremento de las resistencias de morteros en cuya dosificación normalizada se introducen ahorros significativos de cemento pórtland de hasta el 30%, empleando el método del Índice de Keil Modificado (I.K.M.). En los resultados obtenidos se aprecian valores de resistencias mecánicas iniciales de 16,5-24,5 Mpa y normales de 43,2-50,3 Mpa a 7 y 28 días, respectivamente; mientras que el valor del IKM experimenta incrementos entre el 21,64% (7 días) y el 62,1% (a 28 días).

Palabras clave: zeolita, durabilidad, reología, dosificación, cemento pórtland

## **Introducción**

El índice de keil modificado (I.K.M.) es un ensayo de determinación de calidad de un material como puzolana, basado en las propiedades hidráulicas de resistencia a compresión del cemento mezclado con puzolana natural en una proporción determinada (Costafreda, J.L., 2008).

El presente trabajo toma en cuenta el (I.K.M.) como un método experimental para corroborar la reactividad hidráulica de las puzolanas del yacimiento San José-Los Escullos, Cabo de Gata, dado su uso frecuente y efectivo en empresas cementeras de conocido renombre, como Holcim España, S.A., a través del cual efectúan la evaluación de la calidad de ciertos materiales adecuados para las mezclas con cementos pórtland comunes, y obtienen mejoras en otras variedades de cementos pórtland con puzolanas y cementos puzolánicos, respectivamente.

## **Materiales y métodos**

Para el cálculo del (I.K.M.) sobre morteros fabricados con las muestras relacionadas en la tabla 3, se ha tenido en cuenta la relación (1) que existe entre las diferencias de los valores de resistencia a compresión de la mezcla cemento-puzolana, de la mezcla cemento-arena de sílice y del cemento puro con agua normalizada, así como de sus productos en base al 100%. En la línea siguiente se plantea esta relación:

$$Hi \text{ mod } (\%) = 100 \times \frac{(Sb - Sq)}{(Sp - Sq)} \quad (1)$$

Donde:

- **Hi mod (%)**: es el índice de keil modificado, expresado en porcentaje.
- **Sb**: resistencia a compresión de un mortero de cemento mezclado con puzolana (70% cemento pórtland, 30% puzolana natural).
- **Sq**: resistencia a compresión de un mortero de cemento mezclado con arena de sílice (70% cemento pórtland, 30% arena de sílice).
- **Sp**: resistencia a compresión de un mortero de cemento puro (100% cemento pórtland).

En la tabla 1 se presenta la forma normalizada de evaluación de la calidad de materiales que se ensayan como puzolanas a la edad de 7 días; mientras que la tabla 2 sirve para la certificación cualitativa a la edad de 28 días.

Tabla N° 1: Evaluación de la calidad de un material como puzolana según el ensayo de I.K.M. a los 7 días de edad.

<b>Hi mod (%)</b>	<b>Evaluación aproximada</b>
> 100	Excelente
85 – 100	Muy buena
55 – 85	Buena
40 – 55	Suficiente
15 – 40	Pobre
< 15	Muy pobre

*Fuente: norma orientativa utilizada por Holcim España, S.A. para la evaluación de un material como puzolana.*

Tabla 2: Evaluación de la calidad de un material como puzolana según el ensayo de I.K.M. a los 28 días de edad.

<b>Hi mod (%)</b>	<b>Evaluación aproximada</b>
> 80	Muy buena
30 - 80	Buena

*Fuente: norma orientativa utilizada por Holcim España, S.A. para la evaluación de un material como puzolana.*

## Preparación de las muestras

Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de Construcción (LOEMCO), con la asesoría del Laboratorio de la Dirección de Calidad y Procesos de Holcim España S.A. (Calvo, B., Estévez, E. y Costafreda, J. L., 2005), para la investigación con 10 muestras de puzolanas naturales, de cuyas mezclas y dosificaciones con cemento de referencia y arena de sílice se elaboró un total de 20 muestras de morteros (ver tabla 3).

Tabla 3: Relación de muestras de puzolanas naturales y submuestras elaboradas a partir de sus mezclas dosificadas con el cemento de referencia para ser ensayadas a diferentes edades.

Muestra	Tipo de material	Submuestra/ Edad	Dosificación (Sb)	Muestra	Tipo de material	Submuestra/ Edad	Dosificación (Sb)
SJ-7	Mordenita	SJ-7-7 <sup>1</sup>	70% Cemento Referencia 30% Puzolana natural 225 gramos Agua	SJ-13	Toba vítrea dacítica	SJ-13-7	70% Cemento Referencia 30% Puzolana natural 225 gramos Agua
		SJ-7-28 <sup>2</sup>				SJ-13-28	
SJ-9	Mordenita	SJ-9-7		SJ-15	Toba vítrea dacítica	SJ-15-7	
		SJ-9-28				SJ-15-28	
SJ-10	Mordenita	SJ-10-7		SJ-20	Mordenita	SJ-20-7	
		SJ-10-28				SJ-20-28	
SJ-11	Mordenita	SJ-11-7		SJ-26	Mordenita	SJ-26-7	
		SJ-11-28				SJ-26-28	
SJ-12	Mordenita	SJ-12-7		SJ-29-A	Mordenita	SJ-29-A-7	
		SJ-12-28				SJ-29-A-28	

SJ-7-7<sup>1</sup> y SJ-7-28<sup>2</sup>: submuestras elaboradas con la mezcla mixta cemento-pórtland puzolana natural para ser ensayadas a las edades de 7 y 28 días.

Para la realización de este ensayo se aplicaron las mismas condiciones de fabricación de morteros que indican las normas españolas (UNE-EN 196-1:2005 y UNE-EN 933-1:1998), mediante las cuales se calculan la resistencia a compresión del mortero luego de haber transcurrido 7 y 28 días de fraguado, y las propiedades geométricas de los áridos que componen el mortero.

Tabla N° 4: Submuestras obtenidas por la mezcla de morteros de cemento de referencia, arena de sílice y cemento pórtland puro para ser ensayadas a distintas edades.

MUESTRA ORIGINAL	SUBMUESTRA/ Edad	DOSIFICACIÓN (Sq + Sp)
Cemento pórtland de referencia (CEM I 42,5 R)	Sq-7 <sup>1</sup>	70% cemento de referencia 30% arena de sílice 225 gramos de agua
	Sq-28 <sup>2</sup>	
	Sp-7 <sup>3</sup>	100% cemento pórtland 225 gramos de agua
	Sp-28 <sup>4</sup>	

Sq-7<sup>1</sup> y Sq-28<sup>2</sup>: mortero elaborado con cemento de referencia y arena de sílice para ser ensayado a las edades de 7 y 28 días.

Sp-7<sup>3</sup> y Sp-28<sup>4</sup>: mortero elaborado con sólo cemento de referencia (100%) para ser ensayado a las edades de 7 y 28 días.

Las proporciones de las distintas mezclas para elaborar las probetas de morteros son: 70% CemRef-30% Pz, 70% CemRef-30% arena de sílice y 100% CemRef. La cantidad de agua empleada es de 225 gramos (ver tablas 3 y 4).

## Análisis y discusión de los resultados

El resultado de los cálculos de las resistencias a compresión obtenidos del estudio de las probetas de morteros elaborados con distintas mezclas de cemento-puzolana, cemento-arena de sílice y cemento puro-agua normalizada, se presentan en la tabla 5. Tanto en esta tabla como en la 6 se han añadido, tras el número de la muestra, las cifras (7) y (28), para indicar la edad de la probeta del mortero en el momento de ser ensayada.

Los resultados de los ensayos mecánicos a compresión a la edad de 7 días fueron negativos, indicando que los materiales empleados como puzolanas naturales en la mezcla hacen más lento el proceso de fraguado y endurecimiento del mortero a edades inferiores (Costafreda, J.L., Calvo, B. y Estévez, E., 2007), y necesitan más tiempo para reaccionar con el resto de los componentes del cemento en la pasta y para aportar resistencias mecánicas apreciables (ver figura 1).

Tabla N° 5: Resultados del cálculo del I.K.M. en probetas de morteros de cemento-puzolana natural, cemento-arena de sílice y cemento pórtland puro a la edad de 7 días.

Muestra	Sb (Mpa) (a 7 días)	Hi mod (%)	Valoración
SJ-7-7	22,5	14,17	Muy pobre
SJ-9-7	24,0	14,10	Muy pobre
SJ-10-7	20,7	0,74	Muy pobre
SJ-11-7	22,5	14,17	Muy pobre
SJ-12-7	21,8	8,95	Muy pobre
SJ-13-7	23,5	21,64	Pobre
SJ-15-7	21,1	3,73	Muy pobre
SJ-20-7	20,9	2,23	Muy pobre
SJ-26-7	24,5	14,11	Muy pobre
SJ-29-A-7	16,5	8,30	Muy pobre
Sq	20,6		
Sp	34		

De este modo, al comparar los valores del I.K.M. obtenidos en la tabla 5 con los normalizados en la tabla 1, se observa que nueve de diez muestras analizadas han quedado ubicadas en la categoría de “*muy pobre*”, mientras que sólo una se valora como “*pobre*”. Se hace notar, para ambos casos, que todas las muestras, a pesar de exhibir generalmente buenos valores de resistencia mecánica a compresión para esta edad (16,5-24,5 Mpa), no son capaces de alcanzar el porcentaje mínimo indispensable para

satisfacer la calidad del ensayo, fluctuando en un rango inferior del I.K.M. entre 0,74-21,64%.

En la figura 1 puede destacarse que las resistencias mecánicas de todas las muestras, excepto para SJ-29-A-7, superan sensiblemente el valor de Sq, lo que revela el aporte cinético de la mordenita, fundamentalmente, en la reacción hidráulica, que la capacita para ser más eficaz que la simple mezcla de cemento pórtland y arena de sílice.

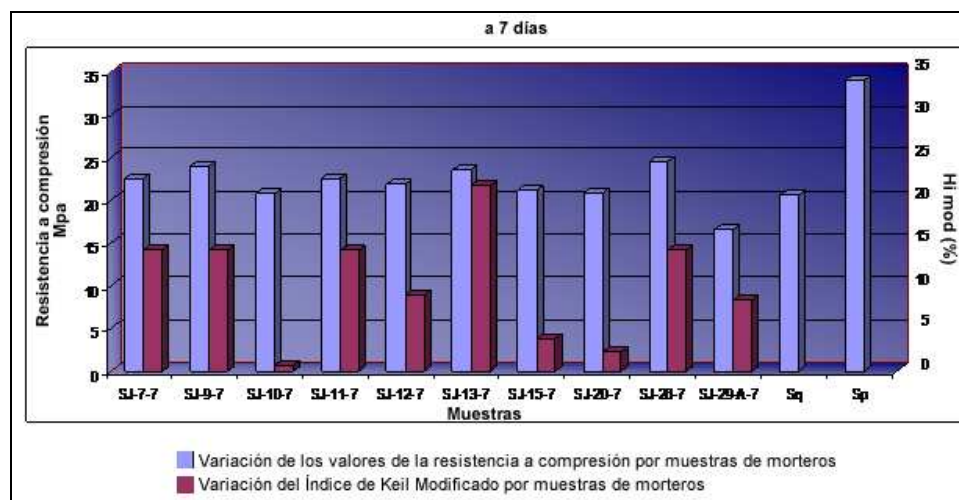


Figura N° 1: Comportamiento de los valores del I.K.M. en relación a la resistencia a compresión para la edad de 7 días.

Los ensayos realizados sobre las probetas de morteros a la edad de 28 días aportaron valores de I.K.M. que prácticamente triplican los porcentajes obtenidos a 7 días; estos valores oscilan entre 34,4-62,1% (ver tabla 6). Todas las muestras de morteros ensayadas cumplen con las exigencias planteadas en la tabla 2, ubicándose en la categoría de “buena”. En la figura 2 se observa, de forma gráfica, la variación del I.K.M. por muestras para los 28 días de fraguado.

Tabla N° 6: Resultados del cálculo del I.K.M. en relación con las resistencias mecánicas en probetas de morteros con puzolana a la edad de 28 días.

Muestra	Sb (Mpa) (a 28 días)	Hi mod (%)	Valoración
SJ-7-28	50,3	62,1	Buena
SJ-9-28	47,9	52,7	Buena
SJ-10-28	49,3	58,2	Buena
SJ-11-28	50,0	60,9	Buena
SJ-12-28	49,2	57,8	Buena
SJ-13-28	44,2	38,3	Buena
SJ-15-28	46,2	46,1	Buena
SJ-20-28	45,3	42,6	Buena
SJ-26-28	49,1	57,4	Buena
SJ-29-A-28	43,2	34,4	Buena
Sq	34,4		
Sp	60,0		

De acuerdo con la figura 2, el aumento de las resistencias mecánicas, a la edad de 28 días, propicia el aumento del valor del I.K.M., siendo el desarrollo de ambas magnitudes directamente proporcional (Costafreda, J.L. y Calvo, B., 2007).

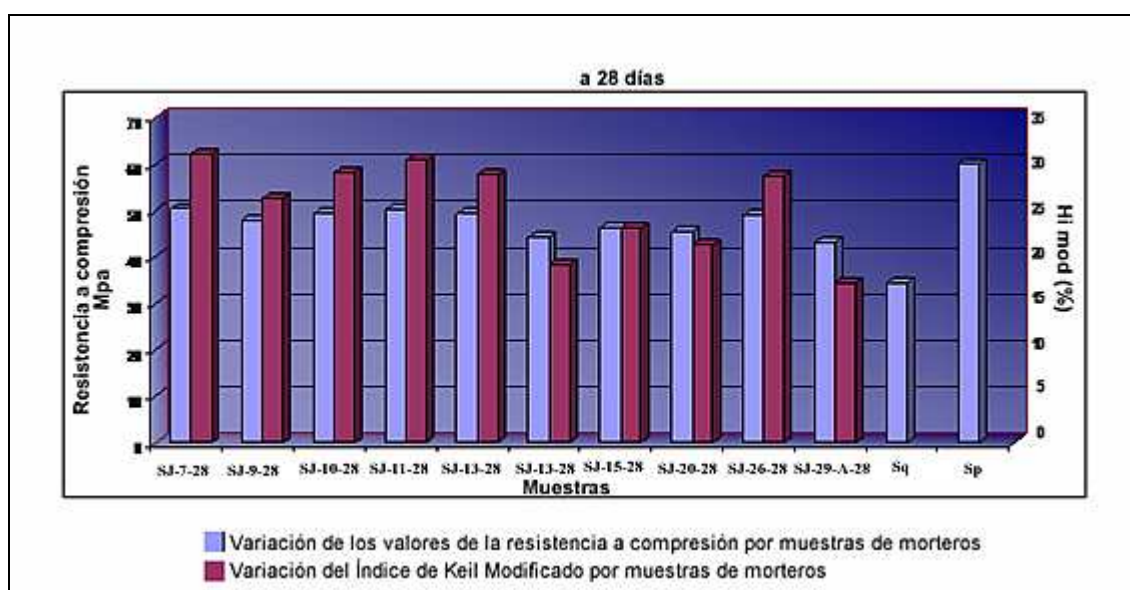


Figura N° 2: Variación de los valores del I.K.M. en relación a las resistencias mecánicas normales para la edad de 28 días.

Es evidente que las reacciones puzolánicas son más intensas a edades cercanas a los 28 días, siendo capaces de aportar resistencias notables en comparación con las muestras patrones. En la figura 2 los I.K.M. calculados para las 10 muestras que contienen mordenita y/o toba vítrea son en su mayoría superiores a los arrojados por Sq, pero en dos muestras (SJ-7-28 y SJ-11-28) el valor del I.K.M. supera con creces a las muestras patrones Sq y Sp, respectivamente.

## Conclusiones

Al comparar la resistencia mecánica a las edades de 7 y 28 días, se concluye que el incremento de su valor indica un crecimiento exponencial, y aun cuando, según lo normalizado, no haya cumplido con los requerimientos a los 7 días de edad, se confirma que la mordenita y la toba vítrea, siendo puzolanas activas, como se ha comprobado, poseen una buena valoración a los 28 días, teniendo en cuenta que las resistencias que aportan requieren de un largo período de tiempo. La comparación entre las figuras 1 y 2, respectivamente, ayuda a consolidar esta conclusión.

Los valores obtenidos del cálculo del I.K.M. demuestran que las muestras de morteros con mordenita y toba vítrea a 7 días no han tenido la capacidad de generar reacciones hidráulicas considerables con los componentes del cemento; sin embargo, a la edad de 28 días se ha desencadenado la reactividad puzolánica en las interfases, valorándose entonces como “buenas”. Esta propiedad, característica infalible de muchas puzolanas, hace que los cementos puzolánicos desarrollen resistencias tempranas muy bajas, pero con el tiempo pueden llegar a generar una mayor resistencia normal.

Es importante destacar que el método empleado en la presente investigación es de aplicación práctica para los materiales puzolánicos, siendo una herramienta auxiliar eficaz para establecer el control de los parámetros de calidad de las materias primas que entren al proceso de producción del cemento pórtland con adiciones y puzolánicos.

## Bibliografía

Costafreda, J.L. (2008), Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería). *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid*. 515 p.

Costafreda, J.L. y Calvo, B. (2007). Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento. *En: Revista Industria y Minería. Número especial n° 371*. ISSN: 1137-8042. 26 pp.



Costafreda, J.L., Calvo, B. y Estévez, E. (2007). Propiedades y aplicaciones de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata, Almería España. *Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007*. La Habana, Cuba. 18 p.

Calvo, B., Estévez, E. y Costafreda, J. L. (2005). Estudio de las propiedades puzolánicas de materiales de origen volcánico ubicados en la zona sureste de España. *V Congreso Ibérico de Geoquímica*, Soria. 10 p.

UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: *Determinación de resistencias mecánicas*.

UNE-EN 933-1:1998. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.